5P

УДК 681.518

В.А. Резников, К.Е. Ефимцева
Государственный университет информатики и искусственного интеллекта,
г. Донецк, Украина

Терминальное управление шахтным водоотливом

Приведена базовая модель системы шахтного водоотлива. Задача управления движением системы сформулирована как задача терминального управления с заданными начальными и конечными состояниями. Приведены результаты моделирования системы управления при ординарном водопритоке.

Постановка задачи

Шахтный водоотлив как один из важных элементов системы безопасности характеризуется большими затратами электроэнергии [1], [2]. Это обусловлено целым рядом факторов различного характера, среди которых наибольший «вес» имеет неэффективное управление системой водоотлива, поскольку график работы водоотливных установок, например, за декаду или месяц в подавляющем большинстве случаев формируется на основе интуиции и опыта эксплуатационного персонала. Поэтому задача разработки системы управления шахтным водоотливом, обеспечивающей снижение затрат на электроэнергию, несомненно является актуальной.

Представим систему водоотлива i-го горизонта в виде структурной схемы, показанной на рис. 1, на котором обозначено: U_i – управление насосом i-го горизонта; $Q_{нi}$ – производительность насоса i-го горизонта; м^3/ч; Q_i – приток воды в водосборник i-го горизонта, м^3/ч; V_i – объем воды в водосборнике i-го горизонта, м^3.

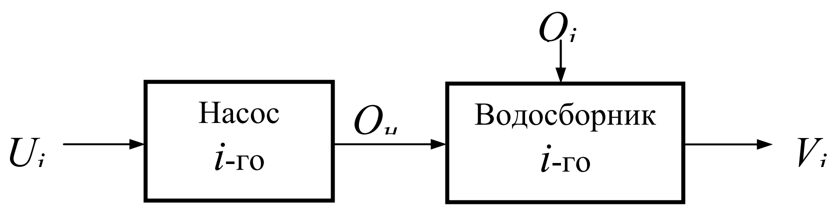


Рисунок 1 – Структурная схема системы водоотлива i-го горизонта

При этом $Q_i = Q_{i,i} + Q_{i,i-1}$, где $Q_{i,i}$ – «естественный» приток воды в водосборник i-го горизонта, $Q_{i,i-1}$ – приток воды в водосборник i-го горизонта из водосборника $(i-1)$-го горизонта.

Переменную $V_i(t)$ будем называть движением системы водоотлива i-го горизонта (или движением i-й подсистемы).

Задачу сформулируем следующим образом: необходимо перевести i-ю подсистему из начального состояния $V_i(t_{iн})$ в заданное конечное состояние $V_i(t_{iк})$ с помощью такого управления U_i, при котором обеспечиваются минимальные энергозатраты E_i при $V_{imin} \le V_i(t) \le V_{imax}$, $V_i(t_{iн}) = V_i(t_{iк})$, $Q_{нi} = const$, $Q_i = const$.

В формализованном виде:

$$E_i \to \min_{U_i \in \Theta_i}, \tag{1}$$

где

$$\Theta_i : \begin{cases} V_i = f_i(t, Q_{нi}, Q_i), \\ Q_{нi} = const, \\ Q_i = const, \\ V_{i\,min} \le V_i \le V_{i\,max}, \\ V_i(t_{iк}) = V_i(t_{iн}). \end{cases} \tag{2}$$

Анализируя область определения управления Θ_i, обратим внимание на следующее:

1) условие $Q_{нi} = const$ означает, что производительность насоса i-го горизонта не регулируется, и потому задачу синтеза управления можно рассматривать как задачу разработки программы $U_i(t_i)$ включения – выключения насоса;

2) из условия $Q_i = const$ следует, что на данном этапе решения задачи приток воды i-го горизонта рассматривается как ординарный (стабильный), то есть рассматривается невозмущенное движение i-й подсистемы;

3) условие $V_i(t_{iк}) = V_i(t_{iн})$ предопределяет равенство объема воды в водосборнике i-го горизонта в начале и в конце заданного календарного периода T, что позволит при ординарном притоке не изменять программу управления на протяжении нескольких периодов T.

С учетом этих замечаний поставленную задачу можно сформулировать таким образом: необходимо разработать программу управления $U_i(t_i)$ насосом i-го горизонта, которая обеспечивает перевод i-й подсистемы за заданный промежуток времени $T = t_{iк} - t_{iн}$ в заданное состояние $V_i(t_{iк})$.

Следовательно, поставленную можно рассматривать как задачу терминального управления. Терминальное управление – это управление, цель которого заключается в переводе объекта в заданное конечное состояние в заданный момент времени.

Главная особенность терминальных задач состоит в неединственности их решения. Иными словами, жесткие требования по точности управления предъявляются только конечной (терминальной) точке, тем самым допуская для формирования оставшейся части траектории известный произвол.

Модель решения задачи

Анализ работ [3-6] показывает, что терминальные системы управления отличаются от других систем, в первую очередь, способом организации процесса управления. Здесь предусматривается прогнозирование будущего движения системы от текущего до терминального момента времени и формирование процесса изменения управляющего воздействия (программы управления), приводящего систему в заданное конечное состояние. Кроме того, задачи терминального управления, как правило, являются многокритериальными, поскольку требование точного достижения терминального состояния в заданный момент времени дополняется критерием интегрального типа.

Синтез систем терминального управления осуществляется в два этапа. На первом этапе из условия экстремума интегрального критерия находится класс функций, определяющих программу управления. В частности, в работе [4] показано, что при терминаль-

ном управлении динамическими объектами, которые описываются дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, программную управляющую функцию рекомендуется определять в классе полиномов вида:

$$U = \sum_{j=0}^{m} C_j t^j , \tag{3}$$

где m – число ограничений на фазовые координаты, C_j – параметры управления.

На втором этапе решается задача синтеза системы управления с обратной связью, что обеспечивает требуемое качество терминального управления при возмущенном движении системы, а также при возможных изменениях параметров объекта. Управление с обратной связью – это управление, при котором текущее управляющее воздействие вырабатывается с учетом состояния объекта управления. Кроме учета текущего состояния объекта управления, программное управление должно обеспечивать точное выполнение терминальных условий и известную «близость» новых траекторий (программ) к исходной программной траектории, соответствующей номинальным начальным условиям [5], [6].

Обратимся к рассматриваемой нами системе. Динамика движения *i-й* подсистемы описывается дифференциальным уравнением первого порядка вида:

$$\frac{dV_i(t)}{dt} = Q_{i,i}(t) + Q_{i,i-1}(t) - Q_{нi}(t), \;\; V_i(0) = V_0 \tag{4}$$

Управляющая функция может принимать только два состояния (включено, выключено), а число ограничений на число фазовых координат в терминальной точке равно порядку системы. В работах [4-6] показано, что полученные для таких условий управляющие функции оказываются оптимальными по интегральному критерию:

$$J = \frac{1}{2}\int_0^T U^2(t)dt , \tag{5}$$

где U – программное управление.

Минимизация интегрального функционала предполагает минимизацию энергетических затрат на управление.

Обозначим через x_i время работы насоса i-го горизонта, а через y_i – время простоя насоса i-го горизонта. Плата за электроэнергию может производиться как по среднему тарифу, так и по многотарифной сетке. Учитывая, что при многотарифной сетке стоимость электроэнергии различна для разного времени суток (день, ночь, пик, полупик), то справедливо следующее равенство:

$$x_i + y_i = 12 . \tag{6}$$

Кроме того, в качестве расчетного календарного периода Т примем сутки, начало которых приходится на 23.00.

С учетом сказанного, время работы-простоя насоса *i-го* горизонта определялось из следующего уравнения:

$$V_i^k = V_i^0 - \left(Q_{нi} - Q_{i,i}\right)\cdot x_i + 12Q_{i,i} + Q_{i,i-1}t_{i-1} , \tag{7}$$

где V_i^0 – объем воды в водосборнике на начало работы (23.00);

V_i^k – объем воды в водосборнике к 11.00;

t_{i-1} – время работы насоса *(I – 1)* -го горизонта за 12 часов.

Из уравнения (7) с учетом равенства (6) формулы для расчета x_i и y_i имеют вид:

$$\begin{cases} x_i = V_i^0 - V_i^k + 12Q_{i,i} + Q_{i,i-1}t_{i-1}, \\ y_i = 12 - x. \end{cases} \tag{8}$$

Стоимость электроэнергии, затраченной *i-м* горизонтом за время Т, определялась следующим образом:
при оплате по среднему тарифу

$$E_i(T) = \sum_{k=1}^{n} N_{ik} x_{ik} e_{1k}, \tag{9}$$

при оплате по многотарифной сетке

$$E_i(T) = \sum_{k=1}^{n} N_{ik} x_{ik} e_{2k}, \tag{10}$$

где n – общее число включений насоса i-го горизонта за время Т;

e_1 – стоимость 1 кВт·ч при оплате по среднему тарифу, грн/1 кВт·ч;

e_2 – стоимость 1 кВт·ч при оплате по многотарифной сетке, грн/ кВт·ч.

Результаты моделирования

В качестве объекта управления была принята система водоотлива шахты «Чайкино», которая характеризуется следующими параметрами:

– горизонт № 1: глубина залегания – 476 м, объем водосборника – 900 м^3, ординарный приток воды – 7 м^3/ч, мощность приводного двигателя – 800 кВт, производительность насосной установки – 280 м^3 /ч;

– горизонт № 2: глубина залегания – 651 м, объем водосборника – 800 м^3, ординарный приток воды – 14 м^3 /ч, мощность приводного двигателя – 200 кВт, производительность насосной установки – 160 м^3 /ч, суммарный приток зумпфа – 130 м^3;

– горизонт № 3: глубина залегания – 908 м, объем водосборника – 1000 м^3, ординарный приток воды – 17 м^3/ч, мощность приводного двигателя – 200 кВт, производительность насосной установки – 160 м^3/ч.

В табл. 1 приведена стоимость электроэнергии в соответствии с действующими нормативными документами.

Таблица 1 – Стоимость электроэнергии

Время суток	Стоимость электроэнергии за 1 ч Вт·ч		
	по среднему тарифу	по многотарифной сетке	
8.00 – 11.00	0,32	пик	0,635
11.00 – 20.00		полупик	0,35
20.00 – 22.00		пик	0,635
22.00 – 8.00		норма	0,0887

Результаты моделирования представлены на рис. 2, 3 и 4, на которых обозначены графики работы насосов, графики изменения объема воды в водосборниках (движение системы), графики потребления и суммарных затрат электроэнергии.

Кроме того, в табл. 2 и 3 показаны результаты расчетов стоимости электроэнергии, из анализа которых следует, что при применении предложенной программы управления насосными агрегатами и оплаты электроэнергии по многотарифной сетке, шахта может ежегодно экономить более 776 548,08 грн.

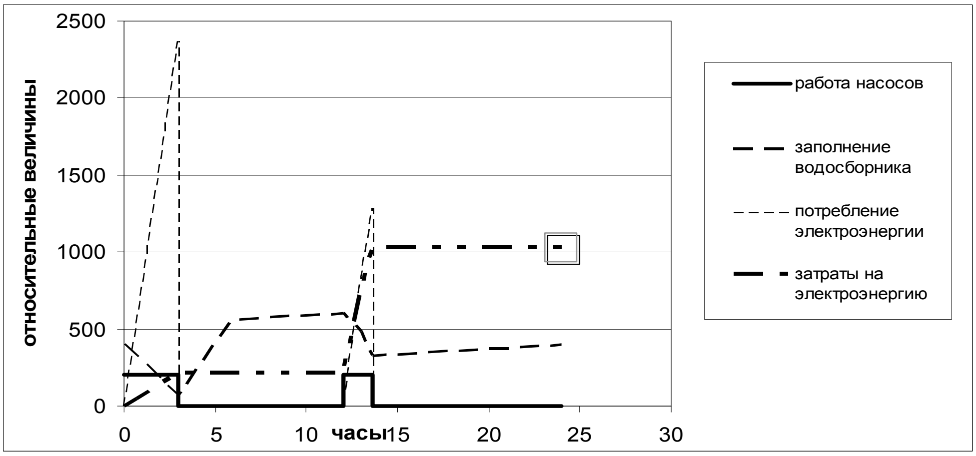


Рисунок 2 – Динамика работы первого горизонта шахты

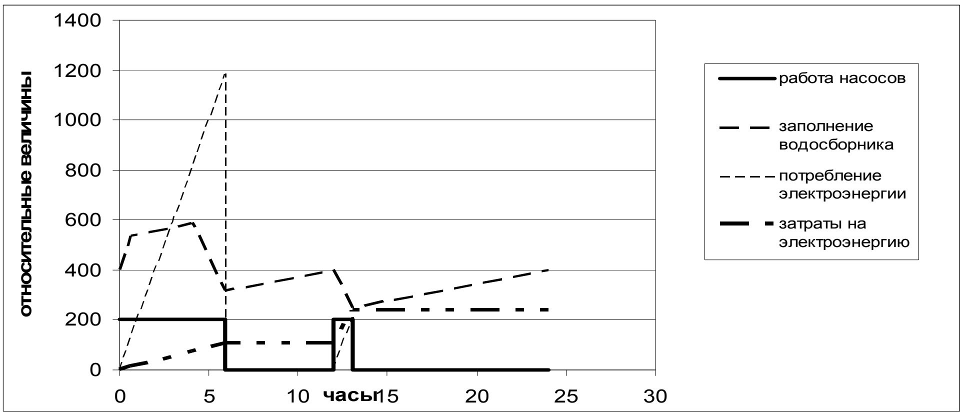


Рисунок 3 – Динамика работы второго горизонта шахты

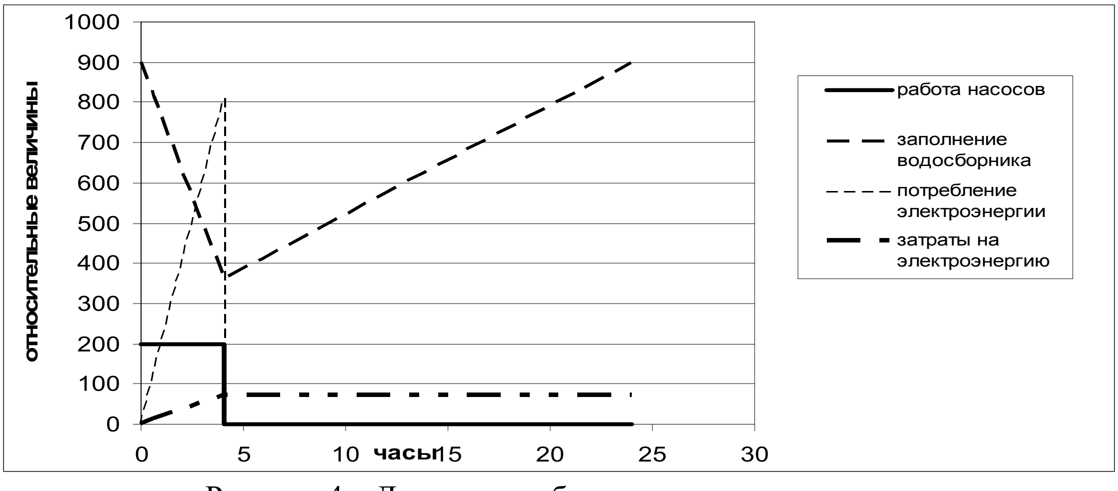


Рисунок 4 – Динамика работы третьего горизонта шахты

Таблица 2 – Результаты расчетов стоимости электроэнергии

Горизонты	Время работы, ч	Оплата электроэнергии, грн					
		В сутки		В месяц		В год	
		по сред. тарифу	по многотар. сетке	по сред. тарифу	по многотар. сетке	по сред. тарифу	по многотар. сетке
1	4,58	2344,96	1027,92	70348,80	30837,648	844185,60	370051,78
2	6,96	890,88	238,193	26726,400	7145,802	320716,80	85749,62
3	4,05	259,20	71,85	7776,000	2155,410	93312,00	25864,92

Таблица 3 – Экономия при оплате электроэнергии

Горизонты	Экономия при оплате электроэнергии, грн		
	В сутки	В месяц	В год
1 (476 м)	1317,04	39511,152	474133,82
2 (651 м)	652,69	19580,598	234967,18
3 (908 м)	187,35	5620,590	67447,08
Всего:	2157,08	64712,340	776548,08

Заключение

Предложенный в данной работе способ управления системой шахтного водоотлива предполагает программное управление без обратной связи. Это полностью оправдано тем, что рассматривается невозмущенное движение системы.

В то же время в реальной системе управления, для которой и разработан данный алгоритм, предусмотрен комплект датчиков, позволяющих контролировать уровень воды в водосборниках, давлении, токи приводных электродвигателей и т.п. Это позволяет не только обеспечить эксплуатационный персонал необходимой информацией, но и создает возможность постановки и решения задачи управления возмущенным движением системы шахтного водоотлива (то есть с учетом возможных приливов и отливов) и корректировки управляющих функций в зависимости от технического состояния оборудования.

Литература

1. Бойко Н.Г. Рудничные (шахтные) водоотливные и вентиляторные установки: конспект / Н.Г. Бойко // ДонНТУ, каф. «Энерго-механические системы». – Донецк, 2009. – 168 с.

2. Попов В.М. Водоотливные установки : [справочное пособие] / Попов В.М. – М. : Недра, 1990. – 253 с.
3. От «Эры Трапезникова» к новым временам. Теория терминальных систем управления [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.ipu65.narod.ru
4. Батенко А.П. Системы терминального управления / Батенко А.П. – М. : Радио и связь, 1984. – 160 с.
5. Крутько П.Д. Алгоритмя терминального управления линейными динамическими системами / П.Д. Крутько // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 1998. – № 6. – С. 33-45.
6. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. Цикл лекций : [учебное пособие для вузов]. – М. : Машиностроение, 2004. – 576 с.

Literatura

1. Bojko N.G. Rudnichnye (shahtnye) vodootlivnye i ventiljatornye ustanovki: konspekt. DonNTU, kaf. “Jenergo-mehanicheskie sistemy”. Doneck. 2009. 168 s.
2. Popov V.M. Vodootlivnye ustanovki: Spravochnoe posobie. M.: Nedra. 1990. 253 s.
3. Ot “Jery Trapeznikova” k novym vremenam. Teorija terminal’nyh sistem upravlenija. http://www.ipu65.narod.ru
4. Batenko A.P. Sistemy terminal’nogo upravlenija. M: Radio i svjaz’. 1984. 160s .
5. Krut'ko P.D. Algoritmja terminal'nogo upravlenija linejnymi dinamicheskimi sistemami. Izv. RAN. Teorija i sistemy upravlenija. № 6. 1998. S 33-45
6. Krut’ko P.D. Obratnye zadachi dinamiki v teorii avtomaticheskogo upravlenija. Cikl lekcij: Uchebnoe posobie dlja vuzov. M.: Mashinostroenie. 2004. 576 s.

В.А. Рєзніков, К.Е. Єфімцева

Термальне управління шахтним відливом

Надана базова модель системи шахтного відливу. Задача управління рухом системи сформована як задача термінального управління із заданим початковим та кінечним станом. Надані результати моделювання системи управління згідно з ординарним водопритоком.

V.A. Reznikov, K.E. Efimtseva

Terminal Control for Mine Pumping

A basic model of the system of mine pumping is shown. The problem of motion control of the system is formulated as a task for terminal control with the set initial and final states. The results of simulation control of the system for ordinary water inflow are given.

Статья поступила в редакцию 29.07.2011.